

ویژگی‌های کانی‌شناسی، شیمی کانی‌ها و میانبارهای سیال کانسار اسکارن آهن معدن جو، ناحیه معدنی سنگان، شمال شرق ایران

مریم فتوت جامی^۱ و مسعود علی پوراصل^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه

صنعتی شاهرود

۲. دانشیار گروه پترولوژی و زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

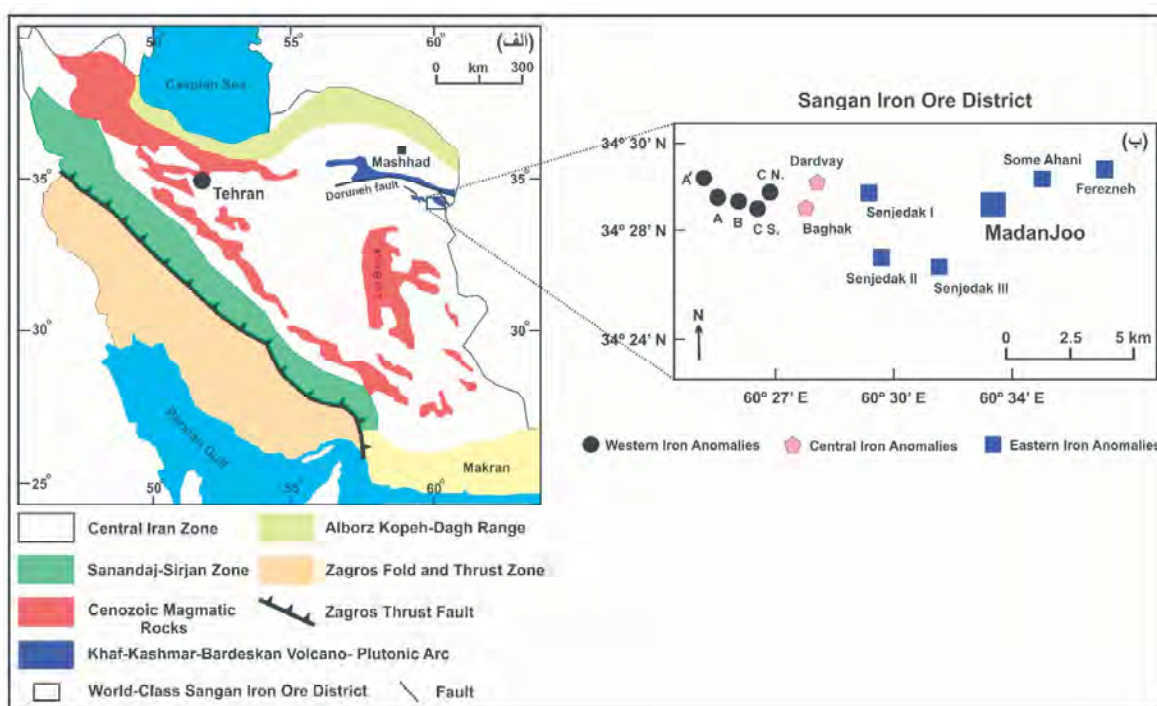
گستره آهن معدن جو، از آنومالی‌های شرقی مجموعه‌ی کانسارهای سنگ آهن در ناحیه‌ی معدنی سنگان است. این پهنه در انتهای بخش شرقی کمان آتشفشانی-نفوذی سنوزوئیک البرز واقع است. زمین‌شناسی پهنه شامل ماسه‌سنگ شیلی، مادستون آهکی و ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک، سنگ‌آهک میکرواسپاریتی تا اسپاریتی و سنگ‌آهک دولومیتی کرتاسه بالایی توالی‌های توفی و گدازه‌ای ائوسن بالایی و سنگ‌های اسکارنی ائوسن میان‌رسوبات کواترنری است. مهم‌ترین رخداد در پهنه معدن جو نفوذ سیال‌های آهن‌دار در سازندهای تخریبی و کرناتی، اسکارن‌زایی و کانه‌زایی آهن است و با وجود منیتیت و کانی‌های کالک‌سیلیکاتی مشخص می‌شود. مناطق اسکارن بر اساس نوع و فراوانی کالک‌سیلیکات‌ها شامل الیون-پیروکسن-گارت اسکارن، گارت-پیروکسن اسکارن، گارت اسکارن، پیروکسن-ولاستونیت-منیتیت اسکارن، منیتیت اسکارن، فلوگوپیت اسکارن، ترمولیت-اکتینولیت اسکارن و اپیدوت اسکارن است. کانه‌زایی آهن به صورت توده‌ای، نواری، رگه-رگچه‌ای، برش‌یو دانه‌پراکنده بیشتر در سنگ‌آهک و دولومیت کرتاسه بالایی و در امتداد گستره گسلی با روند شمال شرق-جنوب غرب رخ داده است. منیتیت کانه اصلی است و با پیریت، کالکوپیریت، پیروتیتو کانی‌های ثانویه آهن همراهی می‌شود. ترکیب گارت‌های معدن جو از نوع آندرادیت-گروسولار (بیشتر آندرادیت)، پیروکسن‌ها از نوع دیوپسید-هدنبرگیت (بیشتر دیوپسید) و الیون‌ها از نوع فورستریت است. مطالعه دما-فشارسنجی بر اساس شیمی پیروکسن، دمای تبلور پیروکسن‌های پهنه را بین ۴۵۸ تا ۶۸۹ درجه سانتی‌گراد، فشار ۲/۲۱ کیلو بار و عمق تبلور از یک تا ۲/۵ کیلومتر مشخص می‌کند. مطالعه میانبارهای سیال سه مرحله پارائنتیک اصلی را در تشکیل اسکارن و نهشت مواد معدنی، در کانسار معدن جو مشخص می‌کند: (۱) مرحله پیش‌رونده با تشکیل پیروکسن و گارت‌های پیش‌رونده در دمای ۳۳۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال بین ۳۳ تا ۵۸ درصد وزنی معادل نمک NaCl، (۲) مرحله پس‌رونده با پیدایش گارت‌های تاخیری، ترمولیت-اکتینولیت و کلسیت مرحله تاخیری در دمای ۱۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال ۱۶ تا ۴۹ درصد وزنی معادل NaCl و (۳) مرحله پس از کانه‌زایی با رگه‌های کلسیت و بندرت کوارتز که در دمای ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد با دامنه شوری ۲ تا ۱۵ درصد وزنی معادل NaCl بوجود آمده است. آمیختگی سیال‌ها، جوشش، رقیق‌شدگی با آب‌های جوی و کاهش دما مکانیسم احتمالی برای تشکیل کانسارهای آهن می‌باشد. در نهایت، کانه‌زایی آهن معدن جو بعنوان کانسار آهن آگرواسکارن منیزیمی معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اسکارن آهن منیزیمی، ژئوشیمی، کانی‌شناسی، معدن جو، میانبار سیال، ناحیه معدنی سنگان.

مقدمه

را شامل می‌شود (گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). در بخش غربی ۵ کانسار به نام‌های A, B, A', C شمالی و C جنوبی، در بخش مرکزی ۲ کانسار دردوی و باغک و در بخش شرقی ۶ کانسار سنجدک I، سنجدک II، سنجدک III، معدن جو، سم آهنی و فرزانه جای دارند (شکل ۱-ب). در این پژوهش، نمونه‌های سنگ و کانسنگ از رخنمون‌ها و مغزه‌های حفاری برداشت شده است و هدف از پژوهش تهیه نقشه زمین‌شناسی ۱/۵۰۰۰ و تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی و پهنه‌های اسکارنی، کانی‌شناسی مناطق اسکارن، شیمی کانی‌های شاخص اسکارن، میانبار سیال و ژنز کانه‌زایی است.

مجتمع معادن سنگان در ۳۰۰ کیلومتری جنوب‌شرق مشهد، ۲۰ کیلومتری شهر سنگان در استان خراسان رضوی و در کمربند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر-بردسکن قرار دارد (شکل ۱-الف). مجموعه‌ی معادن سنگان با ذخیره‌ی بیش از یک میلیارد تن و عیار متوسط ۵۴ درصد اکسید آهن از بزرگترین معادن سنگ آهن ایران و خاورمیانه می‌باشد (Golmohammadi et al., 2015). مجموعه‌ی کانسارهای آهن سنگان در گستره‌ای غربی-شرقی به طول ۲۶ کیلومتر قرار دارند. این گستره به سه بخش غربی، مرکزی و شرقی تقسیم شده است و هر بخش به نوبه‌ی خود چند کانسار



شکل ۱. الف) موقعیت ناحیه معدنی سنگ آهن‌های سنگان در شمال شرق ایران (با تغییر از Stöcklin, 1968)، ب) موقعیت کانسارهای سه‌گانه آهن (آنومالی‌های غربی، مرکزی و شرقی) در ناحیه معدنی سنگان و پهنه اکتشافی معدن جو (با تغییر از گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳)

روش مطالعه

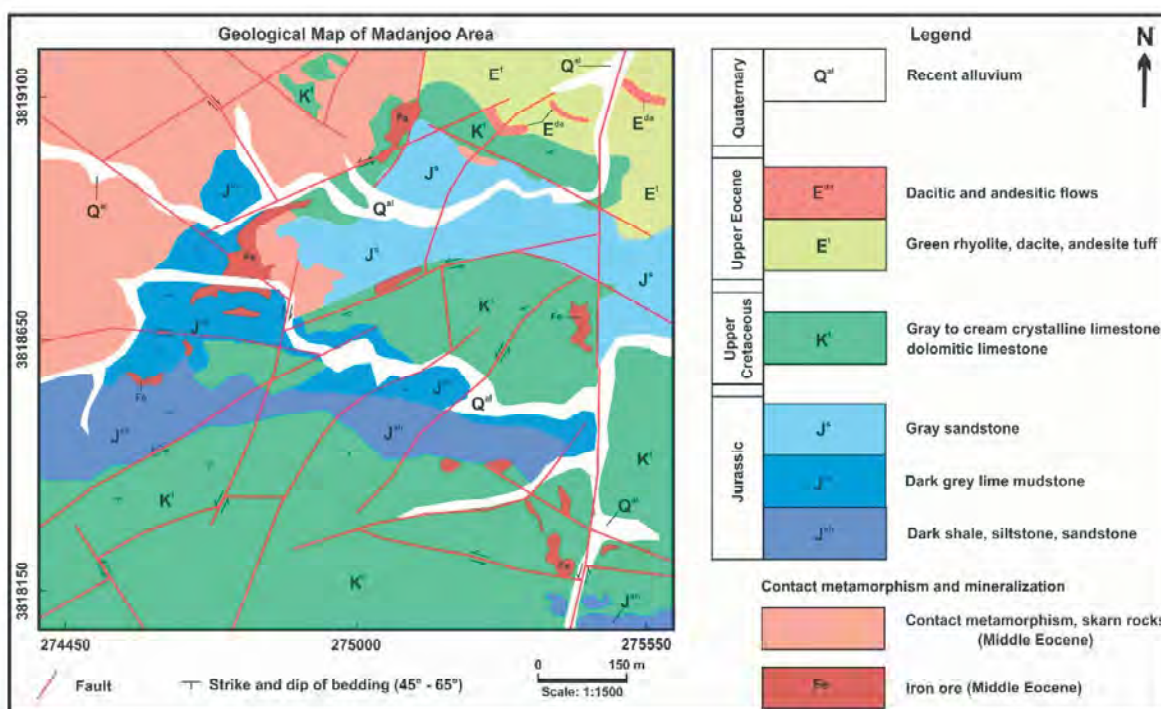
سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و ساخت و بافت ماده معدنی روی مقاطع انجام گرفت. بر اساس شواهد زمین‌شناسی صحرائی و مطالعات میکروسکوپی، تعداد پنج نمونه مقطع نازک-صیقلی از سنگ‌ها و کانسنگ‌های مهم مناطق مختلف اسکارن معدن جو، برای مطالعه‌ی شیمی کانی‌های منیتیت، الیوین، گارنت و پیروکسن با دستگاه ریزکاوا الکترونی مدل

برای بررسی‌های سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و میانبار سیال از سنگ‌ها و کانسنگ‌ها در رخنمون‌های سطحی و مغزه‌های حفاری نمونه‌برداری صورت گرفت. تعداد ۲۶ مقطع نازک، ۱۰ مقطع صیقلی و ۳۴ مقطع نازک-صیقلی از سنگ‌ها و کانسنگ‌های سطحی و زیرسطحی تهیه شده است. سپس مطالعات میکروسکوپی

زمین‌شناسی

کانسار سنگ آهن سنگان از نظر زمین‌ساختاری در انتهای بخش شرقی کمان آتشفشانی-نفوذی سنوزوئیک البرز واقع است، این کمر بند با امتداد غربی-شرقی و خمیدگی به سمت شمال در شمال گسل درونه جای دارد (شکل ۱-الف). در گستره اکتشافی معدن جو واحدهای سنگی از قدیم به جدید شامل ماسه سنگ شیلی، مادستون آهکی و ماسه سنگ‌های ژوراسیک، سنگ آهک و آهک دولومیتی کرتاسه، توالی‌های توفی-گدازه‌ای ائوسن بالایی و سنگ‌های اسکارنی ائوسن میانی و رسوبات کواترنری است (شکل ۲).

Cameca SX100 ساخت کشور فرانسه در آزمایشگاه مرکز تحقیقات مواد معدنی ایمیدرو در کرج به صورت نقطه‌ای تجزیه شده است. حد حساسیت روش ریزکاو الکترونی برای همه عناصر در این تحقیق ۱۰۰ گرم در تن می‌باشد. مطالعه میانبرهای سیال بر روی کانی‌های پیروکسن، گارنت، ترمولیت-اکتینولیت و کلسیت در هفت نمونه دوبرصیقلی از مناطق مختلف اسکارن معدن جو (تعداد ۶۸ نقطه) و با استفاده از دستگاه مدل THMS60 ساخت شرکت لینکام کشور انگلستان در آزمایشگاه دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره آهن معدن جو (فتوت جامی، ۱۳۹۸)

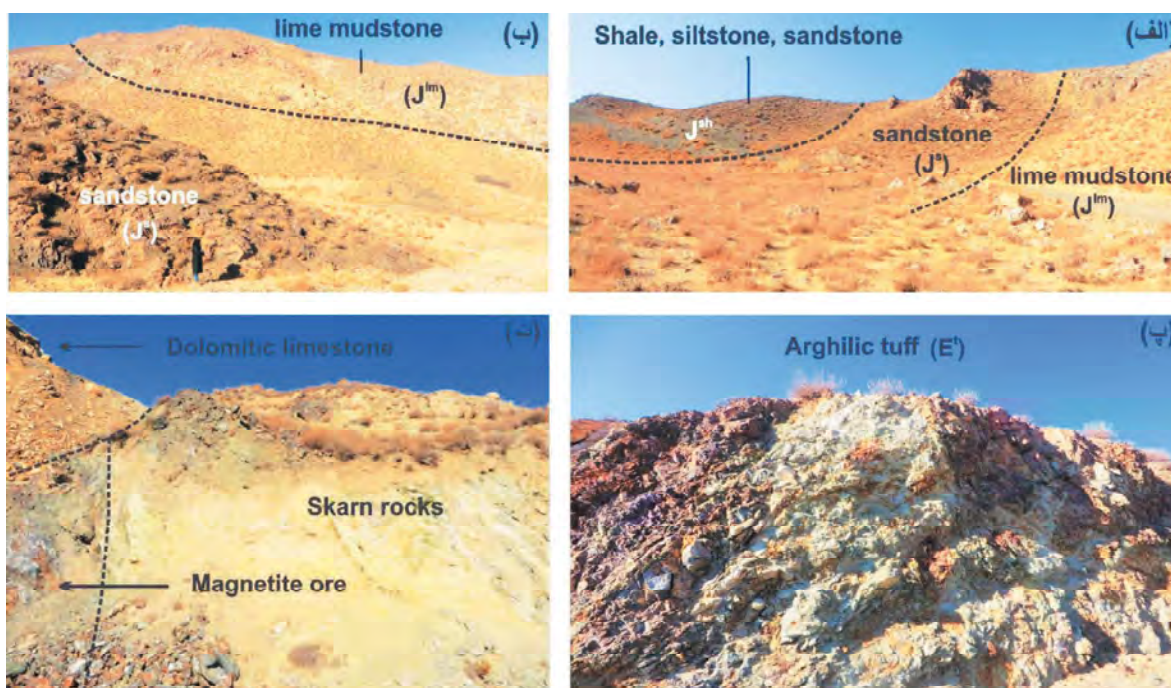
بیشتر دارای سیمان کربناتی و بندرت سیلیسی می‌باشند (شکل ۳-الف، ب). سنگ آهک و آهک دولومیتی شده‌ی میکرواسپارایتی تا اسپارایتی کرتاسه بالایی وسیع‌ترین واحد چینه‌شناختی در گستره اکتشافی معدن جو است و درجات ضعیف تا شدید دگرگونی مجاورتی را متحمل شده‌اند. این واحد کربناتی به دلیل وجود اکسید-هیدروکسیدهای آهن به رنگ کرم تا قهوه‌ای مشاهده می‌شود. این واحد در جهت‌های مختلف توسط رگه-رگچه‌های کلسیت قطع شده است و در

سیلتستون با بافت ریزدانه از کوارتز، پلاژیوکلاز، کانی‌های رسی، سرپسیت و موسکوویت ترکیب یافته و درجه ضعیفی از دگرگونی نشان می‌دهند. واحد مادستون آهکی به رنگ خاکستری تیره دارای بافت ریزدانه میکرایتی است و از بلورهای ریز کلسیت و آثار فسیلی تشکیل شده است. ماسه سنگ‌های ژوراسیک با بافت دانه‌ای دارای رنگ خاکستری هستند. اجزای ماسه سنگ‌ها شامل کوارتز، فلدسپات، کلریت و میکا است. ماسه سنگ‌ها از بلوغ بافتی خوبی برخوردار هستند و

گرانیت-مونزوگرانیت-سینوگرانیت در ناحیه آنومالی‌های شرقی سنگان در طول ائوسن میانی از بارتونین تا لوتسین (۳/۳ تا ۹/۴۲ میلیون سال) جای گرفتند (گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). علاوه بر این، مطالعه U-Pb دانه‌های زیرکن از سه نمونه سینوگرانیت در گستره آنومالی مرکزی در دوی سن‌های ۳۹/۶، ۳۹/۳ و ۳۹/۱ میلیون سال و بر روی دانه‌های زیرکن از دو نمونه سنگ‌های اسکارنی سن‌های ۳۹/۷ و ۳۹/۵ میلیون سال را نشان می‌دهد (Mehrabi et al., 2021). نتایج مطالعات سن‌سنجی ثابت می‌کند، رخداد کانه‌زایی در زمان ائوسن میانی با نفوذی‌های گرانیتی، مونزوگرانیتی و سینوگرانیتی ائوسن ارتباط بسیار نزدیکی دارد. بدین ترتیب که واحدهای سنگی ژوراسیک و کرتاسه در تماس با نفوذی‌های ائوسن دگرگون شده و به سنگ‌های اسکارنی تبدیل شده‌اند و با فاصله از پهنه اسکارن، سنگ‌های آواری ژوراسیک و سنگ‌های کربناتی کرتاسه تبلور مجدد پیدا کرده و مرمری شده‌اند.

محل‌هایی به شدت متبلور و مرمری شده است. در ترکیب این سنگ‌ها، گاهی گارنت، اپیدوت، کلریت، موسکوویت و اکسیدهای آهن نیز که کلسیت و دولومیت را همراهی می‌کنند، وجود دارند.

واحد توفی و گدازه‌ای ائوسن بالایی شامل توف‌های آرزیلیتی و کربناتی و بندرت جریان‌های گدازه‌ای ریولیتی، داسیتی و آندزیتی که تحت تأثیر متاسوماتیسم قرار دارند، می‌باشد. وجود کانی‌های پیروکسن و موسکوویت در مرحله تاخیری تحت تأثیر دگرسانی‌های اپیدوتی و سرپیتی قرار دارد (شکل ۳-پ). سنگ‌های اسکارنی ائوسن میانی، مهم‌ترین واحد زمین‌شناختی در گستره معدن جو است و به دلیل اهمیت آنها، در پهنه‌بندی اسکارن آهن معدن جو به طور جداگانه توصیف می‌شود (شکل ۳-ت). توده نفوذی بیوتیت مونزوگرانیت در فاصله سه کیلومتری در خارج از گستره پژوهش در داخل سازندهای ژوراسیک و کرتاسه نفوذ کرده است. تجزیه U-Pb زیرکن نشان می‌دهد، نفوذی‌های



شکل ۳. الف) تصویر صحرایی از رخنمون شیل، سیلتستون، ماسه‌سنگ و مادستون آهکی ژوراسیک، نگاه به سمت شمال شرق، ب) تصویر صحرایی از رخنمون مادستون آهکی در همبری با ماسه‌سنگ، نگاه به سمت شمال، پ) تصویر صحرایی از واحد توف آرزیلیتی ائوسن بالایی، نگاه به سمت شمال غرب و ت) تصویر صحرایی از واحد اسکارنی پهنه معدن جو (نگاه به سمت شرق)

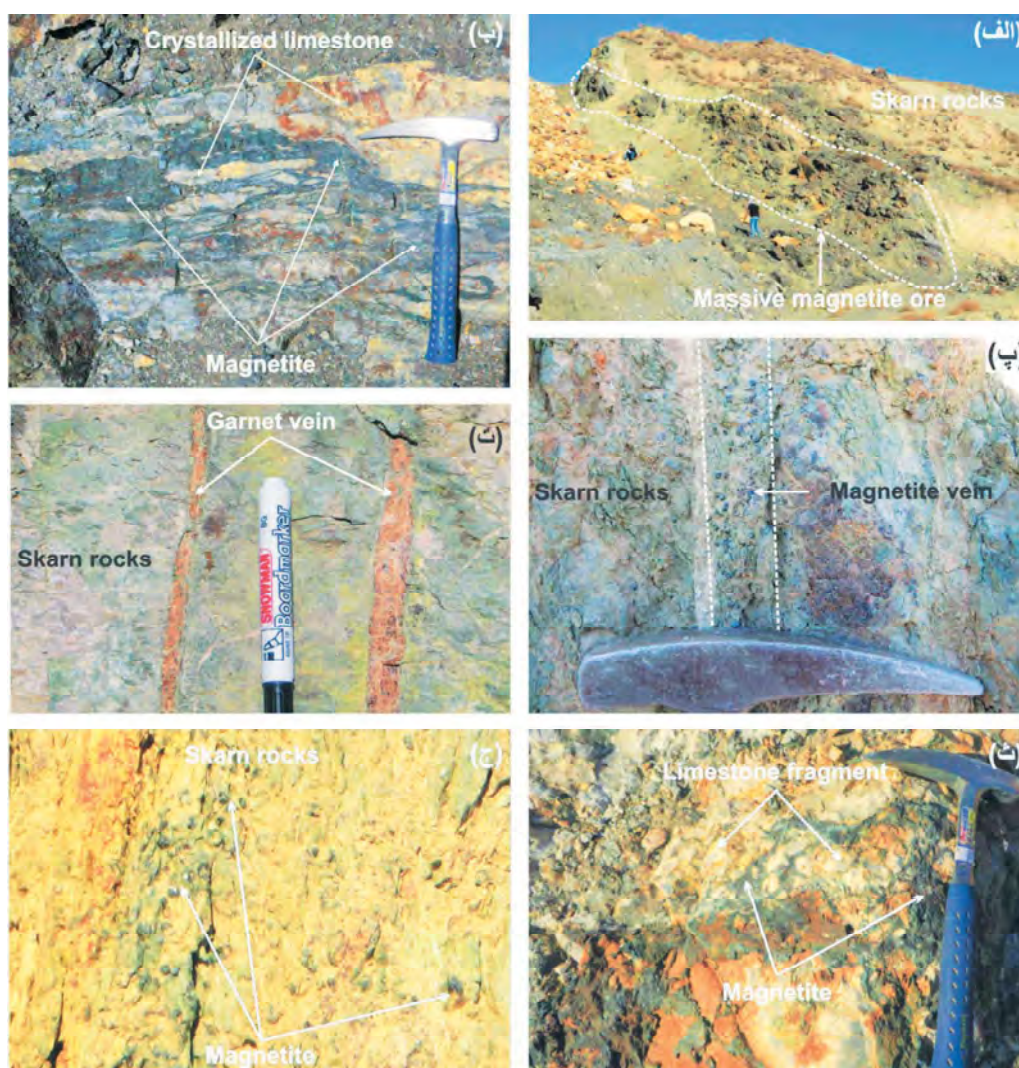
کانه‌زایی در گستره معدن جو

کانه‌زایی در گستره معدن جو در دو مرحله پیشرونده و تاخیری صورت گرفته است. کانی‌های فلزی (اکسیدها و سولفیدها) در مرحله گذر از پیشرونده به تاخیری (مرحله تکوین کانی‌های آب‌دار) و تأثیر آب‌های جوی تشکیل می‌شوند، زیرا در این مرحله محیط برای شکستن کمپلکس‌های حامل فلزات مناسب است (Meinert, 1992). منیتیت مهم‌ترین کانه معدنی در گستره معدن جو است و به صورت اولیه در آخرین مرحله از فاز پیشرونده و شروع فاز تاخیری ته‌نشست شده است. اسپیکولاریت از دیگر کانی‌های اکسیدی در گستره است. رگه-رگچه‌های اسپیکولاریت بیانگر فاز نهایی گرمایی در کانه‌زایی‌های اسکارن است (Einaudi et al., 1981). پیریت نخستین و فراوان‌ترین کانی سولفیدی است و بلورهای آن از شکل دار، نیمه‌شکل دار و بی‌شکل، همراه با منیتیت و هم‌رشدی با کالکوپیریت مشاهده می‌شود. کالکوپیریت به رنگ زرد برنجی و به صورت بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار و همراه با منیتیت و پیریت وجود دارد. پیروتیت نیز به مقدار خیلی کم در نمونه‌های زیرسطحی مشاهده شده است. الیوین، پیروکسن، گارنت، فلوگوپیت، اپیدوت، ولاستونیت، ترمولیت، اکتینولیت، کلریت و کلسیت به همراه کانی‌های اکسیدی و سولفیدی وجود دارند. کانی‌های ثانویه شامل هماتیت، گوتیت، لیمونیت و به مقدار کم اکسید-هیدروکسیدهای منگنز، مالاکیت و آزوریت است. کانه‌زایی منیتیت و کانی‌های همراه در معدن جو به ترتیب فراوانی به شکل‌های توده‌ای، صفحه‌ای، رگه-رگچه‌ای، برشی و دانه‌پراکنده است. در این میان شکل‌های توده‌ای و صفحه‌ای عمومیت دارند (شکل ۴-الف، ب). در معدن جو، کانه‌زایی اکسیدی-سولفیدی و گارنت به صورت رگه-رگچه‌ای در امتداد گسل‌ها و درزه‌های سنگ‌های میزبان مشاهده می‌شود (شکل ۴-پ، ت). کانه‌زایی آهن با ساختار برشی نیز به صورت محلی وجود دارد (شکل ۴-ث). منیتیت و کانی‌های همراه به صورت دانه‌پراکنده در متن سنگ میزبان دیده می‌شود. کانه‌زایی منیتیت دانه‌پراکنده بیشتر در پهنه گارنت اسکارن مشاهده می‌شود (شکل ۴-ج).

سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی اسکارن معدن جو

در گستره معدن جو، نفوذ توده مونزوگرنائیتی ائوسن به داخل شیل، مادستون آهکی و ماسه‌سنگی ژوراسیک و سنگ‌آهک و آهک دولومیتی کرتاسه بالایی سبب تشکیل سنگ‌های اسکارن و کانه‌زایی شده است. مناطق اسکارن به‌ویژه در تماس توده‌های نفوذی با سنگ‌های کربناتی کرتاسه بالایی توسعه یافته است، به طوری که شار حرارتی و سیالات گرمایی ناشی از توده‌های نفوذی، باعث دگرگونی ایزوشیمیایی و تبدیل سنگ‌های آهکی خالص به مرممر و آهک‌های دولومیتی به اسکارن شده است. در فرآیند زایش اسکارن واکنش سیال با کانی‌های سنگ میزبان باعث دگرسانی متاسوماتیک پیشرونده و ایجاد کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بی‌آب (فورستریت، فاسایت، پیروکسن ولاستونیت و گارنت) می‌شود و در گام‌های پایانی مرحله پیشرونده، منیتیت تشکیل شده است. مرحله تاخیری (پسرونده) با تغییرات شرایط فیزیکیوشیمیایی و نفوذ آب‌های جوی حرارت پایین و اختلاط آن‌ها با سیال گرمایی همراه است. طی مرحله تاخیری، در اثر فرآیندهای هیدرولیز و کربن‌گیری، کانی‌های سیلیکاتی بی‌آب به کانی‌های آب‌دار تبدیل می‌شوند. در این مرحله گارنت بیشتر به اپیدوت و کلسیت و پیروکسن به سیلیکات‌های آب‌دار (ترمولیت-اکتینولیت) تبدیل می‌شود. در این مرحله کاهش دما و مصرف H^+ توسط هیدرولیز کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بی‌آب و کانی‌های کربناته (کلسیت) باعث ناپایداری کمپلکس‌های کلریدی و ته‌نشست کانی‌های اکسیدی (منیتیت) و سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت) می‌شود (Einaudi et al., 1981). بر پایه مطالعات سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی، در گستره معدن جو پهنه‌های اسکارنی زیر شناسایی شده است.

الیوین-پیروکسن-گارنت اسکارن: این پهنه اسکارنی شامل کانی‌های الیوین، فاسایت، گارنت، پیروکسن و منیتیت است. مجموعه این کانی‌ها در مرحله پیشرونده اسکارن تشکیل شده است. در این پهنه، کانه‌زایی منیتیت به صورت‌های توده‌ای و رگه‌ای مشاهده می‌شود. وجود کانی الیوین شاهده‌ی بر وجود توده نفوذی در نزدیکی این پهنه و دلیلی بر اسکارن نوع منیزیمی می‌باشد (شکل ۵-الف).



شکل ۴. تصاویری از ساخت‌های مختلف کانه‌زایی در پهنه معدن جو، (الف) شکل توده‌ای منیتیت در تماس سنگ‌های اسکارن و سنگ‌های آهکی و آهک دولومیتی متبلور کرتاسه بالایی (نگاه به سمت شرق)، (ب) کانه‌زایی نواری اکسیدهای آهن که ناشی از نفوذ سیالات کانه‌ساز در امتداد لایه‌بندی سنگ‌آهک‌های متبلور است، (پ) رگه منیتیت در سنگ‌های اسکارن، (ت) رگه‌های گارنت در سنگ‌های اسکارن، (ث) ساخت برشی که منیتیت فضاهای میان قطعات سنگ‌آهک و آهک دولومیتی شده را پر کرده است، (ج) شکل دانه‌پراکنده منیتیت در سنگ‌های اسکارن

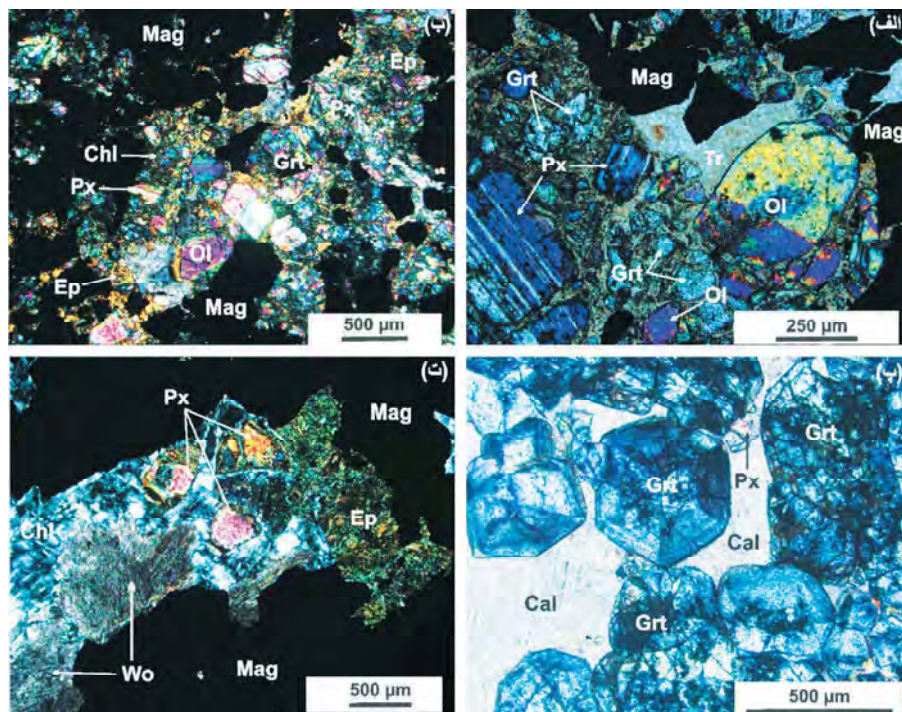
توده نفوذی است. گارنت‌های معدن جو دارای پهنه‌بندی مشخص است که بیانگر تغییر ترکیب شیمیایی آنها می‌باشد (شکل ۵-پ). گارنت‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی گاهی فاقد پهنه‌بندی هستند. تغییرات شیمیایی در مقدار عناصر از مرکز به حاشیه‌ی آنها مشاهده نمی‌شود و دلیل اصلی آن رشد سریع گارنت در یک سیستم بسته است. این ویژگی در گارنت‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی پهنه بروجرد گزارش شده است (رحمانی جوانمرد و همکاران، ۱۳۹۹).

پیروکسن-ولاستونیت-منیتیت اسکارن: پهنه پیروکسن یک پهنه پیشرونده اسکارن است و در همه اسکارن‌ها مشاهده

گارنت-پیروکسن اسکارن: کانی غالب در این زون گارنت است و بوسیله پیروکسن همراهی می‌شود. شواهد بافتی نشان از هم‌رشدی گارنت و پیروکسن در مرحله پیشرونده که با منیتیت، اپیدوت و کلریت مرحله تاخیری دنبال می‌شود، می‌باشد (شکل ۵-ب).

گارنت اسکارن: در گستره معدن جو، گارنت محصول دگرسانی متاسوماتیک پیشرونده و فقیر از آهن است. بلورهای گارنت در این پهنه اغلب شکل دار تا نیمه‌شکل دار و دارای بافت گرانوبلاستیک هستند. همراهی گارنت با بلورهای درشت کلسیت نشان از نزدیکی این پهنه به محل همبری

می شود. این پهنه تنوع ترکیبی مشخصی از خود نشان می دهند. این پهنه اسکارنی در بخش شمال غرب گستره معدن جو و در واحد توفهای آرزلیلی شده همراه با تناوبی از سنگ آهک های



شکل ۵. الف) الیون، پیروکسن، گارنت و منیتیت تشکیل درشت بلورهای الیون و پیروکسن مقدم بر گارنت و منیتیت هستند، (ب) تصویر میکروسکوپی از پهنه گارنت- پیروکسن اسکارن که گارنت و پیروکسن بوسیله منیتیت، اپیدوت و کلریت همراهی می شوند، (پ) پهنه بندی مشخص در گارنت که نشان از تغییر ترکیب شیمیایی در ساختار بلورهای گارنت است و (ت) تصویر میکروسکوپی از کانی های پیروکسن، ولاستونیت و اپیدوت به همراه منیتیت. Ep: اپیدوت، Px: پیروکسن، Mag: منیتیت، Ol: الیون، Grt: گارنت، Tr: ترمولیت، Wo: ولاستونیت، Cal: کلسیت، Chl: کلریت نشانه های اختصاری از (Whitney and Evans 2010)

زوئیزیت و کلینوزوئیزیت همزمان است، زیرا واکنش هایی که سبب پیدایش زوئیزیت می شوند، اکتینولیت را نیز تولید می کنند. ترمولیت مختص سنگ های کربناتی (دولومیتی) دگرگون شده است. کانی غالب در این پهنه ترمولیت است که به همراه آن اکتینولیت نیز مشاهده می شود، ترمولیت ها در مرحله دگرگونی پسرونده (تاخیری) از تبدیل پیروکسن ها ایجاد می شود (شکل ۶-پ).

اپیدوت اسکارن: این پهنه از گسترش به نسبت وسیعی در گستره معدن جو برخوردار است. زوئیزیت یک کانی کم و بیش بدون آهن از کانی های شاخص گروه اپیدوت در این پهنه است. تشکیل زوئیزیت در دمای بالای حدود ۴۰۰ درجه سانتی گراد، فقط زمانی که سیال محیطی از آب خالص باشد ($X_{CO_2} < 0.05$)، رخ می دهد (Groat et al., 2014).

منیتیت اسکارن: منیتیت اسکارن، پهنه اصلی کانه زایی آهن در گستره معدن جو است. در این پهنه، منیتیت بیشتر دارای ساختار توده ای است، اما گاهی به شکل های رگه- رگچه ای و دانه پراکنده نیز مشاهده می شود. در نمونه ها به همراه منیتیت کانی های پیریت، کالکوپیریت و بندرت پیرویت وجود دارد (شکل ۶-الف).

فلوگوپیت اسکارن: در گستره اکتشافی معدن جو با توجه به گسترش وسیع سنگ میزبان دولومیتی و آهک دولومیتی، شرایط برای تشکیل فلوگوپیت مناسب می باشند. کانی غالب در این پهنه فلوگوپیت است و در مواردی با منیتیت همراه است (شکل ۶-ب). وجود این کانی نشانی بر منیزیمی بودن اسکارن معدن جو است.

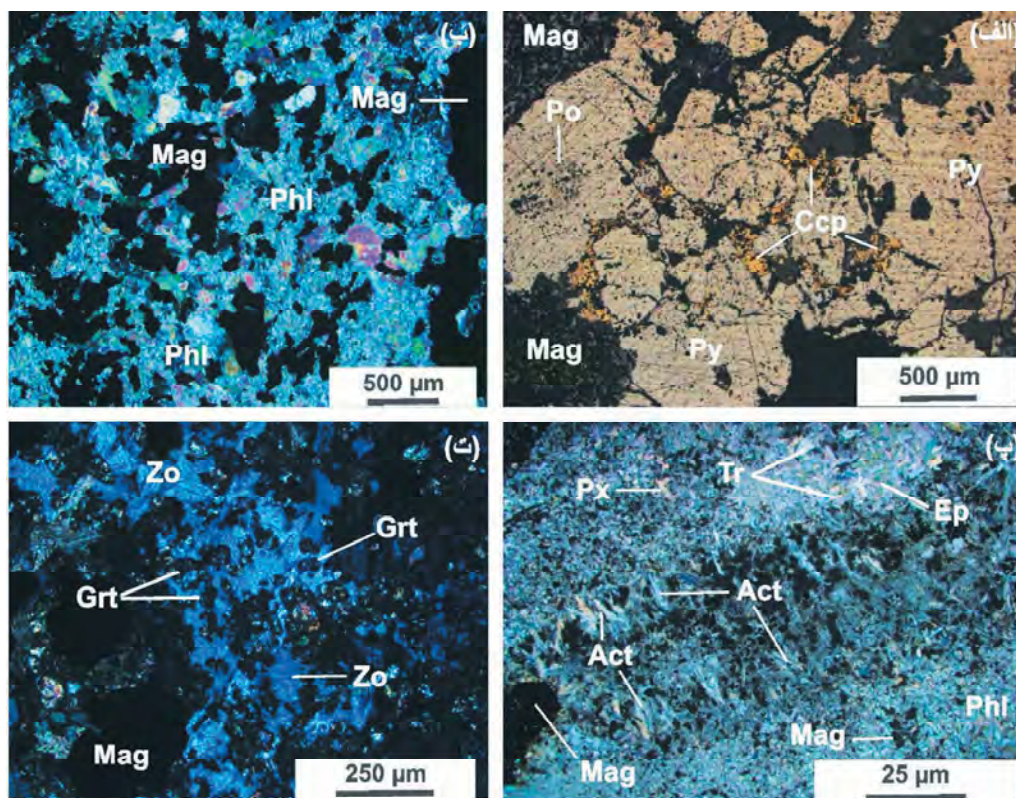
ترمولیت- اکتینولیت اسکارن: ظهور اکتینولیت با ظهور

این کانی با استفاده از روش ریزکاو الکترونی تجزیه شده است. موقعیت نقاط تجزیه و مقادیر غلظت اکسید عناصر به ترتیب در شکل (۷-الف) و جدول ۱ آورده شده است. بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی، SiO_2 بیشترین درصد فراوانی را در ترکیب گارنت دارد و مقدار آن از ۳۷/۵۲ درصد تا ۳۹/۰۳ درصد تغییر می‌کند. CaO ، FeO و Al_2O_3 به ترتیب در مرتبه‌های بعدی قرار دارند. مقایسه ترکیب شیمیایی گارنت‌های معدن‌جو با ترکیب آندرادیت، گروسولار، اسپسارتین و آلماندین مرجع (webmineral.com/data)، مشابهت گارنت‌های معدن‌جو را بیشتر با انواع آندرادیت و گروسولار نشان می‌دهد و غنی از کلسیم هستند (شکل ۷-ب). در مثلث آندرادیت، گروسولار، آلماندین+اسپسارتین (Meinert et al., 2005)، ترکیب گارنت‌های معدن‌جو در گستره آندرادیت-گروسولار و نزدیک به رأس آندرادیت و در گستره ترکیبی اسکارن‌های آهن‌دار جهان قرار می‌گیرند (شکل ۷-پ).

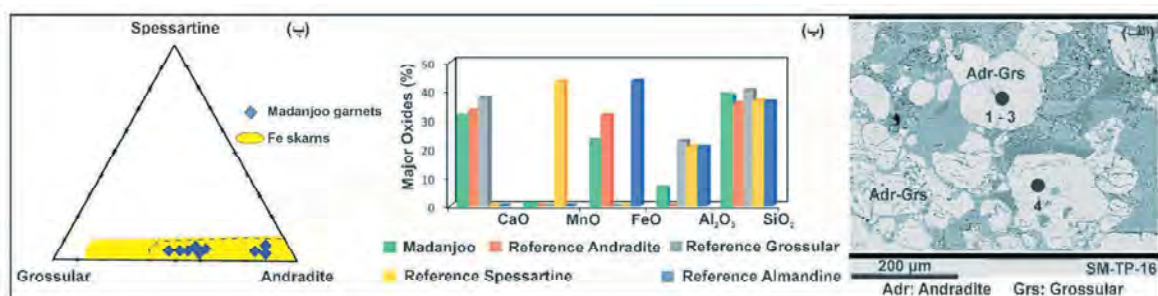
کانی‌های این پهنه که در مرحله دگرگونی پسروده تشکیل شده‌اند شامل زونیزیت، کلریت، کلسیت، اپیدوت، گارنت و منیتیت مرحله تاخیری هستند (شکل ۶-ت).

شیمی کانی‌های پهنه اسکارن

در این پژوهش مطالعه شیمی کانی‌ها در پنج نمونه شاخص از پهنه‌های اسکارن معدن‌جو و بر روی کانی‌های الیوین (فورستریت)، گارنت، پیروکسن، منیتیت، فلوگوپیت، کلریت، کلسیت، دولومیت، پیریت، کالکوپیریت و کالکوسیت به تعداد ۷۲ نقطه انجام شده است (جدول‌های ۱، ۲، ۳ و شکل‌های ۷ تا ۹). در ادامه، تنها به توصیف شیمی کانی‌های مهم پهنه اسکارن از قبیل گارنت، پیروکسن، منیتیت و الیوین اکتفاء شده است. برای اطلاع از ترکیب شیمیایی سایر کانی‌ها به داده‌های جدول (۳) رجوع شود. شیمی گارنت: در گستره معدن‌جو، برای مطالعه ترکیب شیمیایی گارنت و تشخیص نوع آن، تعداد نه نقطه بر روی



شکل ۶. الف) تصویر میکروسکوپی از هم‌رشدی کانی‌های منیتیت، پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت، ب) تصویر میکروسکوپی از همیافتی فلوگوپیت و منیتیت، پ) تصویر میکروسکوپی از ترمولیت، اکتینولیت، پیروکسن و فلوگوپیت و ت) تصویر میکروسکوپی از زونیزیت همراه با گارنت و منیتیت تاخیری. Ep: اپیدوت، Px: پیروکسن، Mag: منیتیت، Py: پیریت، Ccp: کالکوپیریت، Po: پیروتیت، Grt: گارنت، Tr: ترمولیت، Act: اکتینولیت، Zo: زونیزیت، Phi: فلوگوپیت نشانه‌های اختصاری از (Whitney and Evans 2010)



شکل ۷. الف) موقعیت و شماره نقاط تجزیه شیمیایی بر روی کانی‌های گارنت، ب) مقایسه ترکیب شیمیایی گارنت‌های معدن‌جو با ترکیب آندرادیت، گروسولار، اسپسارتین و آلماندین مرجع، که گارنت‌های معدن‌جو بیشتر با انواع آندرادیت و گروسولار مشابه می‌باشند و غنی از کلسیم هستند و پ) موقعیت ترکیب شیمیایی گارنت‌های معدن‌جو در نمودار مثلثی گروسولار-اسپسارتین-آندرادیت (با تغییر از Meinert et al., 2005)

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی (درصد وزنی) گارنت‌های انتخابی از اسکارن آهن معدن‌جو به روش میکروپروب الکترونی

Sample No.	Point No.	Mineral	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Total
	۱		۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۰	۳۰/۴۲	۰/۲۲	۲۰/۷۴	۰/۱۲	۷/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۵۹	۰/۲۳	۹۸/۳۹
	۲		۰/۰۰	۰/۱۰	۰/۰۰	۳۰/۵۰	۰/۲۴	۲۱/۲۱	۰/۲۸	۸/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۹/۰۳	۰/۰۰	۹۹/۴۹
	۳		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۷۵	۰/۲۵	۲۱/۲۲	۰/۰۰	۷/۶۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۱۶	۰/۴۱	۹۸/۴۸
	۴	- Andradite	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۶۲	۰/۳۳	۲۰/۵۷	۰/۱۴	۸/۴۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۷/۶۹	۰/۲۹	۹۸/۱۸
SM-TP-16	۵	Grossular	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۸۰	۰/۲۳	۲۸/۴۳	۰/۰۰	۲/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۴	۳۷/۵۲	۰/۰۰	۹۹/۲۷
	۶		۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۰/۶۳	۰/۲۳	۲۶/۷۴	۰/۰۰	۲/۹۷	۰/۰۰	۰/۰۳	۳۷/۵۷	۰/۰۰	۹۸/۲۶
	۷		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۱/۱۷	۰/۱۱	۲۶/۷۲	۰/۰۰	۲/۱۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۵۷	۰/۰۰	۹۸/۷۲
	۸		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۱/۵۳	۰/۳۶	۱۹/۱۴	۰/۰۰	۸/۹۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۳۲	۰/۳۸	۹۸/۶۸
	۹		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۲/۰۹	۰/۳۳	۱۹/۴۹	۰/۳۶	۸/۹۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۸/۱۹	۰/۲۱	۹۹/۶۴
		Reference Andradite	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۳/۱۱	۰/۰۰	۳۱/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۵/۴۷	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Grossular	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۷/۳۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۲/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۰/۰۲	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Spessartine	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۲/۹۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۰/۶۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۶/۴۱	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference almandine	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۳/۳۰	۰/۰۰	۲۰/۴۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۶/۲۱	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

معدن‌جو را بیشتر با انواع دیوپسید و هیدنبرگیت نشان می‌دهد و غنی از کلسیم و منیزیم هستند (شکل ۸-ب). در نمودار مثلثی هیدنبرگیت-دیوپسید-ژوهانسیت (Meinert et al., 2005)، ترکیب پیروکسن‌های معدن‌جو در گستره دیوپسید-هیدنبرگیت و نزدیک به رأس دیوپسید و در گستره اسکارن‌های آهن‌دار قرار می‌گیرند (شکل ۸-پ). شیمی منیتیت: کانی منیتیت، یک ردیاب پتروژنتیکی مهم است و کاربردهای گسترده‌ای در بررسی‌های زمین‌شناسی اقتصادی و اکتشافات معدنی دارد. شیمی منیتیت به تعداد ۳۴ نقطه در نمونه‌های SM-TP-06، SM-B-49-131 و SM-B-55-42 اندازه‌گیری شده است. موقعیت نقاط تجزیه و مقادیر غلظت اکسید عناصر به ترتیب

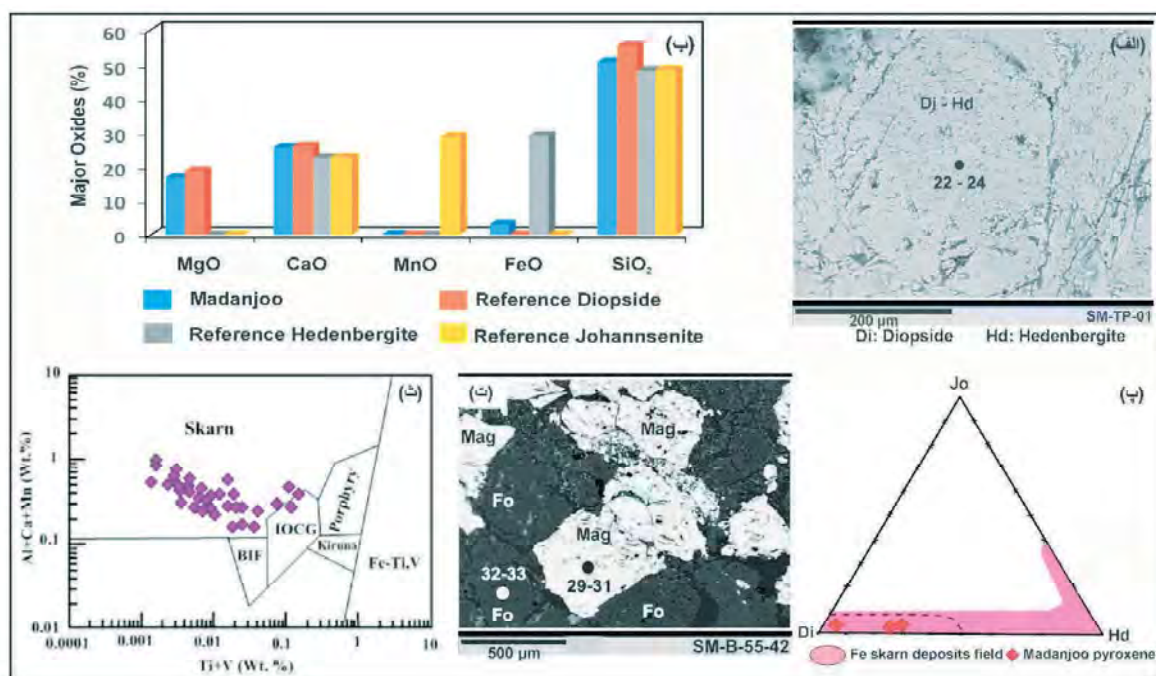
شیمی پیروکسن: پیروکسن از کانی‌های شاخص اسکارن‌ها است و در مرحله پیش‌رونده اسکارن‌زایی ایجاد می‌شود. در گستره معدن‌جو پیروکسن به همراه الیوین، گارنت، ولاستونیت، فلوگوپیت و منیتیت در بیشتر پهنه‌های اسکارنی وجود دارد. در این گستره، برای مطالعه ترکیب شیمیایی پیروکسن و تشخیص نوع آن، تعداد سه نقطه بر روی این کانی با استفاده از روش ریزکاو الکترونی تجزیه شده است. موقعیت نقاط تجزیه و مقادیر غلظت اکسید عناصر به ترتیب در شکل (۸-الف) و جدول ۲ آورده شده است. مقایسه ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های معدن‌جو با ترکیب دیوپسید، هیدنبرگیت و ژوهانسیت مرجع (webmineral.com/data)، مشابهت پیروکسن‌های

در شکل (۸-ت) و جدول (۳) آورده شده است. مقدار FeO از کمینه ۸۷/۲۷ درصد تا بیشینه ۹۳/۴۵ درصد در منیتیت‌های معدن جو تغییر می‌کند و متوسط آن ۹۰/۴۴ درصد است. از ترکیب شیمیایی منیتیت برای شناسایی منیتیت‌های ماگمایی و گرمابی و انواع مختلف کانسارهای

سنگ آهن استفاده می‌شود. به عنوان مثال نمودار Ti+V در مقابل Al+Ca+Mn، برای تشخیص انواع کانسارهای آهن بکار برده می‌شود (Dupuis and Beaudoin, 2011). در این نمودار شیمی منیتیت‌های معدن جو در گستره کانسارهای آهن اسکارن قرار می‌گیرند (شکل ۸-ث).

جدول ۲. نتایج تجزیه شیمیایی (درصد وزنی) پیروکسن‌های انتخابی از اسکارن آهن معدن جو به روش میکروپروب الکترونی

Sample No.	Point No.	Mineral	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total
	۲۲	- Diopside	۰/۳۳	۰/۰۲	۱۵/۱۴	۲۴/۷۸	۰/۱۷	۴/۱۹	۳/۷۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۰/۵۳	۰/۲۹	۰/۰۷	۹۹/۲۶
SM-TP-01	۲۳	Hedenbergite	۰/۲۰	۰/۰۴	۱۶/۲۳	۲۵/۶۸	۰/۲۱	۴/۶۴	۱/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۰/۷۵	۰/۲۶	۰/۰۰	۹۹/۰۶
	۲۴		۰/۰۳	۰/۰۹	۱۸/۸۹	۲۶/۵۳	۰/۰۴	۰/۴۹	۰/۷۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۱/۶۳	۰/۱۲	۰/۰۰	۹۸/۵۸
		Reference Diopside	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۸/۶۱	۲۵/۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۵/۴۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Hedenbergite	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۲/۶۰	۰/۰۰	۲۸/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۸/۴۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
		Reference Johannsenite	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۲/۶۹	۲۸/۷۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۸/۶۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰



شکل ۸. الف) موقعیت و شماره نقاط تجزیه شیمیایی بر روی کانی‌های پیروکسن، ب) مقایسه ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های معدن جو با ترکیب دیوپسید، هدنبرگیت و ژوهانسنیت مرجع (پیروکسن‌های معدن جو بیشتر با دیوپسید و تا حدودی با هدنبرگیت مشابه بوده و غنی از کلسیم و منیزیم هستند)، پ) موقعیت ترکیب شیمیایی پیروکسن‌های معدن جو در نمودارهای مثلثی دیوپسید (Di) - هدنبرگیت (Hd) - ژوهانسنیت (Jo) (Meinert et al., 2005)، ت) موقعیت و شماره نقاط تجزیه شیمیایی بر روی منیتیت و کانی‌های دیگر (ث) نمودار دوتایی Ti+V در مقابل Al+Ca+Mn و موقعیت نمونه‌ها در گستره کانسارهای آهن اسکارن

روش ریزکا و الکترونی همانند روش سنگ‌نگاری وجود الیون را در نمونه‌ی SMB-TP-55-42 ثابت می‌کند. نتایج تجزیه تعداد سه نقطه (نقاط تجزیه ۳۲، ۳۳ و ۳۴) بر روی کانی الیون (فورستریت) در جدول (۳) آورده شده است. بر پایه

شیمی الیون: الیون (فورستریت) از جمله کانی‌های دما بالا در گستره معدن جو است و همراه با کانی‌های فاسایت، پیروکسن، گارنت و منیتیت در پهنه اسکارن مشاهده شده است. تجزیه‌ی شیمیایی کانی‌ها با استفاده از

ادامه جدول ۳.

Sample No.	Point No.	Mineral	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	CoO	NiO	V ₂ O ₃	SO ₂	CuO	ZnO	Total
	۲۹		۰/۰۷	۰/۱۸	۹۰/۸۸	۱/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۲/۷۵
	۳۰	Magnetite	۰/۱۲	۰/۱۷	۹۱/۲۴	۱/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۲/۹۶
	۳۱		۰/۱۰	۰/۱۲	۹۲/۴۵	۱/۳۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۶/۰۹
	۳۲		۳۴/۰۱	۰/۰۰	۲/۰۷	۵۸/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۴/۷۵
	۳۳	Forsterite	۳۴/۴۴	۰/۰۰	۲/۰۳	۵۸/۵۳	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۵/۷۹
SM-B-55-42	۳۴		۳۵/۴۹	۰/۰۳	۱/۹۰	۵۹/۴۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۲۶	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۷/۵۲
	۳۵		۰/۰۷	۰/۰۶	۹۲/۷۶	۰/۹۳	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۵/۱۲
	۳۶		۰/۶۷	۰/۱۱	۸۹/۵۶	۱/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۱/۸۷
	۳۷	Magnetite	۰/۱۳	۰/۱۰	۹۱/۸۸	۱/۲۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۴/۳۰
	۳۸		۰/۱۱	۰/۱۲	۹۰/۴۰	۱/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۲/۰۹
	۳۹		۰/۱۳	۰/۱۰	۹۱/۵۱	۱/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۹۳/۱۲

ترکیب تک کلینوپیروکسن و کلینوپیروکسن-مذاب ارائه شده است (Nimis and Taylor, 2000). روش تک کلینوپیروکسن بر اساس محاسبه میزان فعالیت انستاتیت در کلینوپیروکسن و بدون دخالت ترکیب مذاب طراحی شده است و همواره بر پایه تعادل Ca-Mg می‌باشد (Putirka, 2008). در این پژوهش برای تخمین شرایط فشار و دما به روش تک کلینوپیروکسن از برنامه Winpyrox (Yavuz, 2013) استفاده شد. بر اساس رابطه زیر برای تخمین شرایط دما و فشار تبلور پیروکسن در اسکارن معدن جو اقدام شده است:

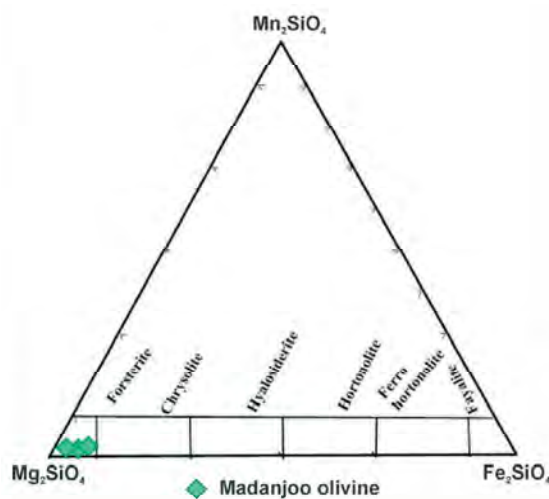
$$T(K) = 93100 + 544P(kbar)/61.1 + 36.6(XTi^{cpx}) + 10.9(XFe^{cpx}) - 0.95(XAl^{cpx} + XCr^{cpx} - XNa^{cpx} - XK^{cpx}) + 0.395[\ln(aEn^{cpx})^2]$$

بر اساس این معادله دمای تشکیل کلینوپیروکسن‌های اسکارن معدن جو بین ۴۵۸ تا ۶۸۹ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۲۱ کیلو بار بر آورد شده است. شکل (۱۰-الف) نمودار فشار-دما را برای کلینوپیروکسن‌های اسکارن معدن جو نشان می‌دهد.

مطالعه میانبارهای سیال

در سامانه‌های ماگمایی-گرمایی، ماگماها از نظر تأمین حرارت، سیالات ماگمایی و فلزات دارای اهمیت می‌باشند. پتانسیل کانه‌زایی این ماگماها تابع ترکیب سیالات ماگمایی و زمان خروج آن‌ها از ماگما است که در سیالات و مذاب‌های درگیر ثبت می‌شود (John et al., 2010). بررسی دمای تشکیل کانسارها، شوری و ترکیب شیمیایی سیالات کانه‌ساز و فشار حاکم بر محیط کانه‌زایی در شناخت نوع کانه‌زایی و

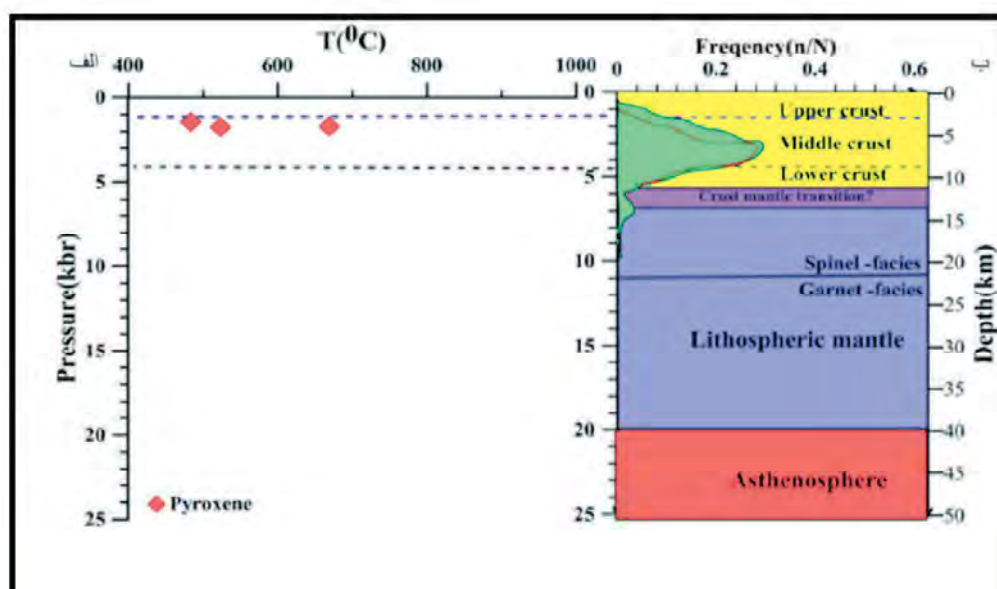
نتایج تجزیه‌های شیمیایی MgO و SiO₂ بیشترین درصد وزنی این کانی را تشکیل می‌دهند. مقدار MgO از ۵۸/۲۵ درصد تا ۵۹/۴۵ درصد و SiO₂ از ۳۴/۰۱ تا ۳۴/۴۹ تغییر می‌کند. در نمودار مثلثی Mn₂SiO₄ (تفروئیت)، Mg₂SiO₄ (فورستریت)، Fe₂SiO₄ (فایالیت) (Deer et al., 1996)، هر سه نقطه در گستره فورستریت قرار می‌گیرند (شکل ۹).



شکل ۹. نمودار مثلثی فورستریت-فایالیت-تفروئیت و موقعیت نمونه‌ها در گستره فورستریت

زمین دما-فشارسنجی بر اساس ترکیب پیروکسن

ترکیب شیمیایی کلینوپیروکسن‌ها تابعی از تغییرات شرایط فشار و دما است (Yavuz, 2013; Aydin et al., 2009). بر این اساس، از ترکیب شیمیایی پیروکسن‌ها برای تعیین دما و فشار سنگ‌های حامل آن‌ها استفاده می‌شود (Putirka, 2008). دو نوع مدل دما-فشارسنجی بر اساس



شکل ۱۰. الف) نمودار دما-فشار برای کلینوپیروکسن‌های اسکارن معدن جو، ب) تصویر شماتیک از ساختار لیتوسفر (کلینوپیروکسن‌ها در عمق یک تا ۲/۵ کیلومتری متبلور شده‌اند) (Putirka, 2008)

تعداد خیلی کم در نمونه‌ها مشاهده شده است. از نظر تعداد فاز، چهار نوع میانبار سیال در این کانی‌ها مشاهده شده است، میانبارها عبارت از میانبارهای تک‌فازی مایع (L)، میانبارهای دوفازی غنی از مایع (L+V)، میانبارهای دوفازی غنی از گاز (V+L)، میانبارهای سه‌فازی مایع-گاز-هالیت (L+V+S) می‌باشند (شکل ۱۱-الف، ب، پ، ت).

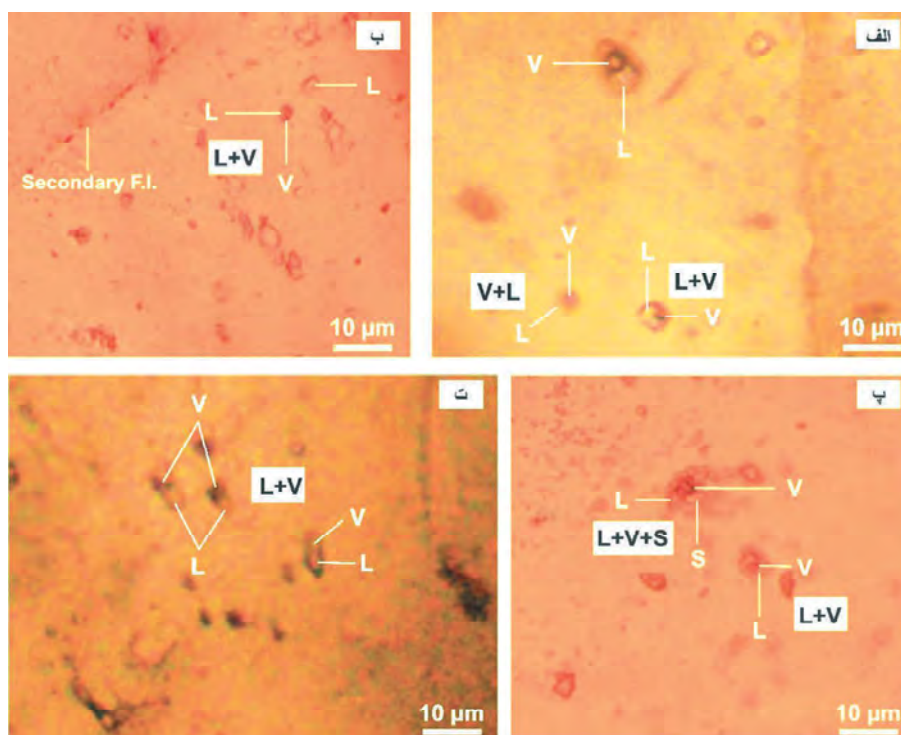
ریزدماسنجی میانبارهای سیال

روش ریزدماسنجی میانبارهای سیال بر پایه مشاهده دقیق و تشخیص تغییرات فازی درون میانبارهای سیال هنگام گرمایش و سرمايش است. با اندازه‌گیری دقیق دمایی که این تغییرات در آن رخ می‌دهد، می‌توان به وضعیت سیال‌ها در زمان به دام افتادن پی برد (Shepherd et al., 1985). نتایج حاصل از مطالعات ریزدماسنجی برای کانی‌های گارنت، کلسیت، پیروکسن و ترمولیت از پهنه اسکارن آهن معدن جو به ترتیب در جدول ۴ آورده شده است. نتایج مطالعات گرمایش سیالات نشان می‌دهد، تغییرات دمایی همگن شدن میانبارها به فاز مایع برای پیروکسن مرحله پیش‌رونده از ۳۳۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، گارنت پیش‌رونده از ۳۹۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، گارنت مرحله تاخیری از ۱۷۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، ترمولیت تاخیری از ۲۷۵ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، کلسیت تاخیری از

ارائه مدل اکتشافی بسیار مهم است (Beane, 1983). در گستره معدن جو برای بررسی میانبارهای سیال در کانی‌های گارنت، پیروکسن، ترمولیت و کلسیت، تعداد هفت نمونه از پهنه‌های مختلف اسکارن معدن جو انتخاب شد. این کانی‌ها شامل: ۱- گارنت، از پهنه‌های گارنت و پیروکسن-گارنت اسکارن، ۲- پیروکسن، از پهنه پیروکسن اسکارن، ۳- ترمولیت، از پهنه ترمولیت-اکتینولیت اسکارن و ۴- کلسیت از پهنه‌های منیتیت و گارنت-پیروکسن اسکارن می‌باشد. در این پژوهش، تعداد ۷۰ میانبار سیال اولیه مورد آزمایش ریزدماسنجی قرار گرفت.

پetroگرافی میانبارهای سیال

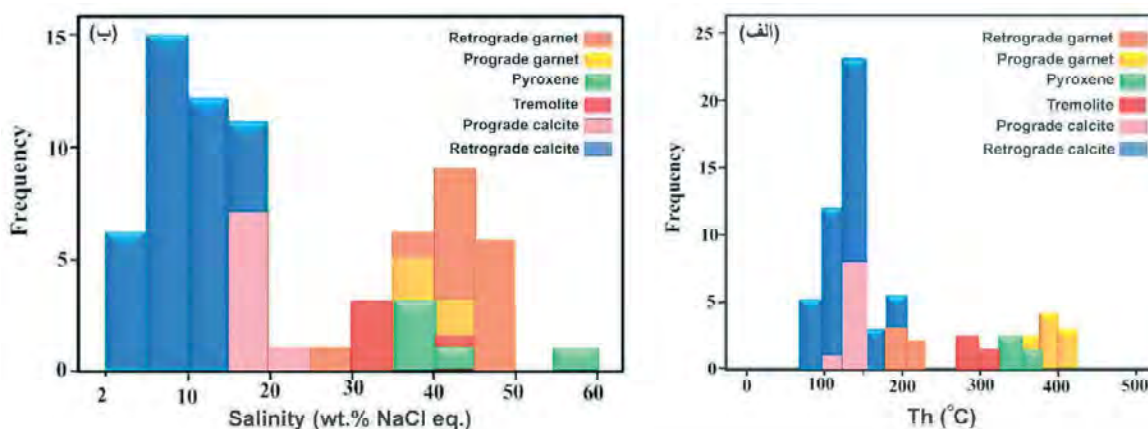
پetroگرافی، یکی از مهم‌ترین مراحل مطالعه میانبارهای سیال است. میانبارهای سیال در نمونه‌های معدن جو دارای اندازه‌های سه تا ۲۰ میکرون هستند. میانبارهای سیال از نظر شکل ظاهری به صورت‌های بی‌شکل، نیمه‌شکل‌دار، تمام‌شکل‌دار، کشیده و بلور منفی می‌باشند. در برخی از میانبارهای سیال پدیده باریک‌شدگی نیز دیده می‌شود. از دید ژنتیکی، میانبارهای سیال از نوع میانبارهای اولیه (P) و ثانویه (S) تشخیص داده شده‌اند. این میانبارها در همه نمونه‌ها بیشتر دارای دو فاز ترکیبی مایع و گاز هستند و میانبارهای تک‌فازی مایع و سه‌فازی جامد-مایع-گاز به



شکل ۱۱. تصاویر میانبارهای سیال از کانی‌های اسکارن معدن جو. الف) میانبارهای سیال دوفازی (V+L)، (L+V) در کلسیت، ب، پ) میانبارهای سیال تک‌فازی (L)، دوفازی (L+V) و (V+L)، سه‌فازی (L+V+S) و میانبارهای ثانویه در گارنت، ت) میانبارهای سیال دوفازی (L+V) در پیروکسن

۱۲۰ تا ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد و کلسیت پس از کانه‌زایی از ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. در کل دامنه تغییرات دما برای تمام کانی‌ها از ۹۵ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد است. مقدار کمینه دما برای کلسیت و مقدار بیشینه آن برای گارنت مرحله پیش‌رونده ثبت شده است (شکل ۱۲-الف). مقدار شوری میانبارهای سیال برای پیروکسن از ۳۷/۱۷ تا ۵۷/۵۷، گارنت پیش‌رونده از ۳۳/۰۲ تا ۴۲/۳۸، گارنت

تاخیری از ۲۹/۵۳ تا ۴۹/۰۵، ترمولیت از ۳۵/۴۰ تا ۴۲/۳۸، کلسیت تاخیری از ۱۶/۳۳ تا ۲۷/۱۴ و برای کلسیت پس از کانه‌زایی از ۲/۰۱ تا ۱۵/۳۲ درصد وزنی معادل نمک طعام در تغییر است. کمینه شوری با مقدار ۲/۰۱ در کلسیت و بیشینه آن با مقدار ۵۷/۵۷ درصد وزنی معادل نمک طعام در پیروکسن ثبت شده است (شکل ۱۲-ب).



شکل ۱۲. مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال در اسکارن آهن معدن جو. الف) نمودار ستونی فراوانی دمایی همگن شدن، ب) نمودار ستونی فراوانی شوری میانبارهای سیال در کانی‌های شاخص اسکارن

جدول ۴. نتایج مطالعات ریزدماسنجی میانبراهای سیال برای کلسیت، گارنت، پیروکسن و ترمولیت در اسکارن آهن معدن جو

Sample-Point	Size (μm)	Type	Phases	Te (°C)	Tm (ice) (°C)	Th (°C)	Salinity (wt. % NaCl eq.)
SM-13		گارنت					
۱	۳	P	L+V	-۱۳۵	-۴۶	۱۹۵	۴۳/۵۸
۲	۵	P	L+V	-۱۰۹	-۴۳	۲۰۰	۴۰/۱۴
۳	۴	P	L+V	-۱۰۰	-۵۰	۱۹۰	۴۹/۰۴
۴	۳	P	L+V	-۱۱۰	-۴۵	۱۸۵	۴۲/۳۷
۵	۴	P	L+V	-۱۱۵	-۵۰	۱۸۰	۴۹/۰۵
۶	۳	P	L+V	-۸۵	-۴۰	۱۷۰	۳۷/۱۷
۷	۵	P	L+V	-۹۵	-۴۸	۱۹۰	۴۶/۱۸
۸	۴	P	L+V	-۹۰	-۴۵	۱۸۰	۴۲/۳۸
۹	۳	P	L+V	-۸۵	-۳۵	۱۸۵	۳۳/۰۲
۱۰	۷	P	V+L	-۷۵	-۳۰	۲۰۰	۲۹/۵۳
۱۱	۵	P	L+V	-۹۵	-۳۵	۴۱۰	۳۳/۰۲
۱۲	۴	P	L+V+S	-۱۱۰	-۴۵	۴۰۵	۴۲/۳۸
۱۳	۵	P	L+V	-۱۰۰	-۴۵	۴۰۰	۴۲/۳۸
۱۴	۶	P	L+V	-۱۰۰	-۳۵	۳۹۰	۳۳/۰۲
۱۵	۷	P	L+V	-۱۰۵	-۳۸	۳۹۵	۳۵/۴۰
SM-13		کلسیت					
۱	۳	P	L+V	-۳۵	-۶	۱۲۵	۹/۴۹
۲	۷	P	L+V	-۴۰	-۱۱	۱۱۰	۱۵/۳۲
۳	۵	P	L+V	-۳۵	-۵	۱۰۵	۸/۱۳
۴	۳	P	L+V	-۳۲	-۸	۹۵	۱۲/۰۰
۵	۴	P	L+V	-۳۵	-۵	۱۰۰	۸/۱۳
۶	۷	P	L+V	-۴۲	-۱۵	۱۳۰	۱۹/۰۸
۷	۷	P	L+V	-۳۷	-۱۲	۱۳۵	۱۶/۳۳
۸	۶	P	L+V	-۳۷	-۱۱	۱۴۰	۱۵/۳۲
SM-55-67		کلسیت					
۹	۴	P	L+V	-۴۰	-۱۰	۱۲۰	۲۷/۱۴
۱۰	۵	P	L+V	-۳۵	-۸	۱۲۵	۱۲/۰۰
۱۱	۴	P	L+V	-۲۸	-۸	۹۵	۱۲/۰۰
۱۲	۴	P	L+V	-۲۳	-۱۲	۱۰۰	۱۶/۳۳
۱۳	۵	P	L+V	-۳۵	-۹	۱۰۵	۱۳/۱۶
۱۴	۵	P	L+V	-۲۷	-۱۱	۹۵	۱۵/۳۲
۱۵	۵	P	L+V	-۳۸	-۴	۱۱۰	۶/۷۱
۱۶	۴	P	L+V	-۳۰	-۲	۱۰۰	۳/۶۵
۱۷	۵	P	L+V	-۳۳	-۸	۹۵	۱۲/۰۰
۱۸	۵	P	L+V	-۳۲	-۷	۹۵	۱۰/۷۷
۱۹	۶	P	L+V	-۴۵	-۲	۱۹۰	۳/۶۵
۲۰	۵	P	L+V	-۳۷	-۱	۱۸۵	۲/۰۱
۲۱	۵	P	L+V	-۳۵	-۶	۱۸۵	۹/۴۹
۲۲	۵	P	L+V	-۴۰	-۲	۱۴۳	۳/۶۵
۲۳	۴	P	L+V	-۳۷	-۴	۱۳۷	۶/۷۱
۲۴	۵	P	L+V	-۳۷	-۵	۱۳۰	۸/۱۳
۲۵	۵	P	L+V	-۳۰	-۴	۱۳۲	۶/۷۱
۲۶	۴	P	V+L	-۴۲	-۴	۱۳۰	۶/۷۱
۲۷	۶	P	V+L	-۳۵	-۳	۱۲۵	۵/۲۲

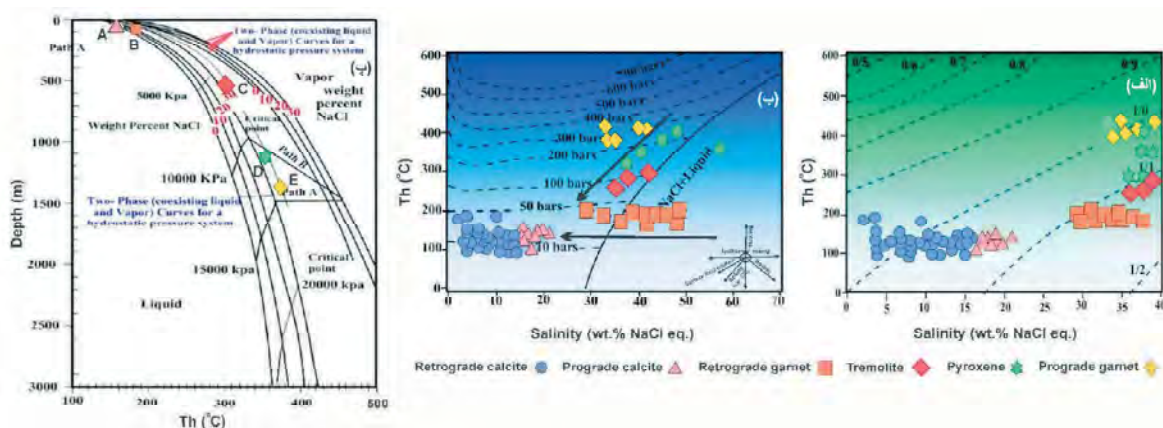
ادامه جدول ۴.

Sample-Point	Size (μm)	Type	Phases	Te ($^{\circ}\text{C}$)	Tm (ice) ($^{\circ}\text{C}$)	Th ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (wt. % NaCl eq.)
۲۸	۶	P	V+L	-۳۵	-۵	۱۲۷	۸/۱۳
۲۹	۵	P	L+V	-۳۶	-۲	۱۲۷	۳/۶۵
۳۰	۶	P	L+V	-۳۸	-۴	۱۳۰	۶/۷۱
۳۱	۷	P	L+V	-۳۵	-۸	۱۲۵	۱۲/۰۰
۳۲	۷	P	L+V	-۳۲	-۷	۱۲۰	۱۰/۷۷
۳۳	۶	P	L+V	-۳۴	-۶	۱۲۰	۹/۴۹
۳۴	۵	P	L+V	-۳۱	-۵	۱۱۵	۸/۱۳
۳۵	۶	P	L+V	-۴۰	-۱۰	۱۳۵	۱۴/۲۷
۳۶	۶	P	L+V	-۳۷	-۷	۱۴۰	۱۰/۷۷
۳۷	۵	P	L+V	-۳۳	-۴	۱۲۵	۶/۷۱
۳۸	۵	P	L+V	-۲۷	-۲	۱۲۰	۳/۶۵
۳۹	۱۰	P	L+V+S	-۴۲	-۱۱	۱۶۰	۱۵/۳۲
۴۰	۱۲	P	V+L	-۴۰	-۹	۱۳۰	۱۳/۱۶
۴۱	۵	P	L+V	-۴۳	-۱۷	۱۳۵	۲۰/۷۲
۴۲	۵	P	L+V	-۳۴	-۱۲	۱۳۰	۱۶/۳۳
۴۳	۴	P	L+V	-۳۳	-۱۳	۱۲۷	۱۷/۲۹
۴۴	۷	P	L+V	-۳۵	-۱۵	۱۲۴	۱۹/۰۸
۴۵	۶	P	L+V	-۳۵	-۱۴	۱۲۵	۱۸/۲۰
SM-01					پیروکسن		
۱	۶	P	L+V	-۹۵	-۴۲	۳۵۰	۳۹/۱۰
۲	۴	P	L+V	-۹۰	-۴۷	۳۸۰	۴۴/۸۵
۳	۳	P	L+V	-۹۴	-۴۵	۳۷۵	۴۲/۳۸
۴	۵	P	L+V	-۹۲	-۵۵	۳۵۵	۵۷/۵۷
۵	۴	P	L+V	-۷۰	-۴۰	۳۳۰	۳۷/۱۷
SM-11					ترمولیت		
۱	۵	P	L+V	-۷۵	-۴۳	۳۰۰	۴۲/۳۸
۲	۴	P	L+V	-۷۰	-۴۰	۲۸۵	۳۷/۱۷
۳	۳	P	L+V	-۶۵	-۳۸	۲۷۵	۳۵/۴۰

بحث

بر اساس نمودار دما-فشار-عمق (Haas, 1971)، کلسیت و گارنت تاخیری در عمق ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر، ترمولیت در عمق ۶۰۰ متر، پیروکسن در عمق ۱۲۰۰ و گارنت پیش‌رونده در عمق ۱۴۰۰ متر تشکیل شده است. بر اساس مقادیر کمینه و بیشینه دمای همگن‌شدن و شوری، عمق تقریبی کانه‌زایی به ترتیب ۱۰۰ متر و ۱۴۰۰ متر تخمین زده می‌شود (شکل ۱۳-ب). لازم به ذکر است که عمق تخمینی برای تبلور پیروکسن بر اساس داده‌های میانبار سیال (۱/۲ کیلومتر) با عمق محاسبه شده بر اساس دما-فشارسنجی پیروکسن (یک تا ۲/۵ کیلومتر، شکل ۱۰-الف) تایید می‌شود.

چگالی، فشار و عمق به دام افتادن میانبارهای سیال
با استفاده از نمودارهایی که بر اساس دمای همگن‌شدن و شوری میانبارهای سیال برای محاسبه چگالی، فشار بخار و عمق به دام افتادن میانبارهای سیال طراحی شده است (Driesner and Heinrich, 2007; Wilkinson, 2001)، چگالی سیال‌ها برای همه کانی‌ها از یک تا ۱/۱ تغییر می‌کند و فشار بخار در دامنه‌ی ۱۰ تا ۴۰۰ بار قرار می‌گیرد، پیروکسن و گارنت پیش‌رونده تحت فشار بخار ۱۰۰ تا ۴۰۰ بار و ترمولیت، گارنت تاخیری و کلسیت تاخیری تحت فشار بخار کمتر از ۱۰۰ بار تشکیل شده‌اند (شکل ۱۳-الف، ب).



شکل ۱۳. الف) نمودار دما-شوری برای تعیین چگالی محلول‌های NaCl-H₂O اشباع از بخار (Wilkinson, 2001)، ب) نمودار تعیین فشار بخار محلول بر حسب دمای همگن شدن و شوری (Driesner and Heinrich, 2007)، آمیختگی سیال‌ها، رقیق شدگی سیال و جوشش از عوامل مهم در نهشت کانی‌ها در اسکارن معدن‌جو هستند، پ) نمودار دما-فشار-عمق جهت تعیین عمق تشکیل کانسار (Haas, 1971)، (در نمودار عمق تقریبی به دام افتادن میانبارهای سیال در کانی‌های شاخص اسکارن معدن‌جو مشخص شده است)

منشاء و تکامل سیال کانسار ساز

سیال و کاهش انحلال‌پذیری عناصر کانه‌ساز و نهشت ماده معدنی می‌شود (تقی‌پور و بذرافشان، ۱۳۹۴؛ Drummond and Ohmoto, 1985). به عبارتی سیال گرمابی و شور اولیه با سیال با درجه شوری پایین‌تر (آب‌های جوی و آب‌های سازندی) در انتهای مراحل کانه‌زایی مخلوط شده است. همچنین وجود بلورهای نمک NaCl در میانبارهای سیال نشان می‌دهد، کاتیون‌های آهن از طریق یون‌های کلر منتقل شده‌اند. میزان کلرید محلول‌های متاسوماتیکی به احتمال زیاد بیشترین کنترل‌کننده انتقال و تهنشست آهن در اسکارن‌ها است (Meinert, 1992). بر اساس نتایج مطالعه میانبارهای سیال سه مرحله پاراژنتیک اصلی تشکیل اسکارن و نهشت مواد معدنی در کانسار معدن‌جو شناخته شده است: ۱) مرحله پیش‌رونده با تشکیل پیروکسن و گارنت‌های پیش‌رونده در دمای ۳۳۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال بین ۳۳ تا ۵۸ درصد وزنی معادل نمک NaCl توسعه یافته است، ۲) مرحله پس‌رونده با پیدایش گارنت‌های تاخیری، ترمولیت-اکتینولیت و کلسیت مرحله تاخیری در دمای ۱۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با شوری سیال ۱۶ تا ۴۹ درصد وزنی معادل NaCl تشکیل شده است و ۳) مرحله پس از کانه‌زایی با رگه‌های کلسیت و بندرت کوارتز که در دمای ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد با دامنه شوری ۲ تا ۱۵ درصد وزنی معادل NaCl بوجود آمده است.

در نهشت کانی‌ها و تشکیل ذخایر معدنی، عوامل تغییر دما (سرد شدن سیالات کانه‌ساز)، تغییر فشار، تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش سیال کانه‌ساز با سنگ میزبان و تغییرات شیمیایی ناشی از پدیده آمیختگی سیال‌های ماگمایی و جوی و جوشش سیال از اهمیت بالایی برخوردار هستند (Barnes, 1997). جوشش و آمیختگی سیالات دو عامل مهمی هستند که همواره باعث فوق اشباع شدن سریع سیالات ماگمایی و ایجاد شرایط لازم جهت تهنشست کانه‌ها در سنگ‌های میزبان می‌شوند (Wilkinson, 2001). بر اساس داده‌های ریزدماسنجی، پراکنش شوری‌ها در مقابل دمای همگن شدگی در میانبارهای سیال اسکارن معدن‌جو، روندهای متفاوت آمیختگی هم‌دما، جوشش و رقیق شدگی سطحی سیال مشاهده می‌شود (شکل ۱۳-ب). فرآیندهای آمیختگی هم‌دما و رقیق شدگی سطحی سیالات از عوامل مهم در ناپایداری کمپلکس‌های کلریدی و نهشت آهن در پهنه‌های اسکارنی و به دنبال آن تشکیل فازهای سولفیدی و اکسیدی در مراحل پایانی کانه‌زایی است. پدیده جوشش سیال نیز در نتیجه کاهش ناگهانی فشار در شکستگی‌ها و گسل‌ها ایجاد می‌شود. شواهدی از قبیل وجود ساختار برشی و میانبارهای سیال غنی از بخار رخداد احتمالی جوشش سیال را در پهنه معدن‌جو تایید می‌کنند. پدیده آمیختگی سیال‌ها موجب کاهش دمای سیستم، کاهش دمای انحلال

مقایسه کانسار آهن معدن جو با سایر کانسارهای آهن در ناحیه سنگان

بر اساس مقادیر غلظت عناصر اصلی و کمیاب، شیمی منیتیت‌های معدن جو در گستره کانسارهای آهن اسکارن قرار می‌گیرند (شکل ۸-ث). در ترکیب الیوین مقدار MgO از ۵۸/۲۵ درصد تا ۵۹/۴۵ درصد و SiO_2 از ۳۴/۰۱ تا ۳۴/۴۹ تغییر می‌کند و از نظر ترکیب شیمیایی در گستره فورستریت هستند (شکل ۹). مطالعات انجام شده روی آنومالی‌های آهن غربی (آنومالی‌های A، A'، C جنوبی و شمالی)، مرکزی (آنومالی‌های باغک و دردوی) و شرقی (آنومالی سنجدک ا) نشان می‌دهد، آنومالی‌های آهن A، A' و C جنوبی از نوع اسکارن کلسیمی هستند و با حرکت به سوی شرق، اسکارن کلسیمی به منیزیمی تغییر می‌یابد به طوری که آنومالی‌های C شمالی، باغک، دردوی و سنجدک ا ترکیب منیزیمی دارند (Golmohammadi et al., 2015)؛ مظهری و همکاران، ۱۳۹۵). کانه‌زایی آهن بغل‌بید که از آنومالی‌های شرقی آهن سنگان است از نوع گرمابی معرفی شده است (سربوزی حسین‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۹). اگرچه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی آنومالی آهن معدن جو بی‌شابهت با سایر آنومالی‌های آهن در ناحیه معدنی سنگان نیست، با وجود این قرابت آن به آنومالی سنجدک ا بیشتر است و ترکیب منیزیمی دارد.

نتیجه‌گیری

کانسار آهن معدن جو در بخش شرقی ناحیه معدنی سنگان در شمال شرق ایران واقع است. سنگ‌های آهکی و دولومیتی کرتاسه بالایی میزبان اصلی کانه‌زایی آهن است و در امتداد ساختارهای گسلی با روند NE-SW و در مجاورت با توده‌های نفوذی دگرگون شده‌اند. اگرچه رخنمونی از سنگ‌های نفوذی در معدن جو مشاهده نمی‌شود، اما وجود کانی الیوین در پهنه اسکارن شاهدهی بر نزدیکی سنگ‌های میزبان به توده‌های نفوذی است و رخنمون توده‌های بیوتیت گرانیب در سه کیلومتری گستره مورد مطالعه، این گفته را تایید می‌کند. تشکیل کانی‌های کالک‌سیلیکاتی بی‌آب الیوین، پیروکسن و گارنت و سیلیکات‌های آبدار فلوگوپیت، ترمولیت، اکتینولیت، هورنبلند، اپیدوت و کلریت، اسکارن‌زایی را تایید می‌کند. کانه‌زایی آهن (بیشتر مگنتیت) به صورت‌های توده‌ای، نواری، رگه-رگچه‌ای، برشی و دانه‌پراکنده در گذر از

در گستره معدن جو، کانه‌زایی آهن (بیشتر به صورت منیتیت) با ساختار توده‌ای، نواری، رگه-رگچه‌ای، برشی و دانه‌پراکنده در سنگ‌های میزبان رسوبی دگرگون شده (بیشتر سنگ‌های آهکی-دولومیتی) در مرحله عبور از فاز پیش‌رونده به تاخیری و به همراه سیلیکات‌های بدون آب تشکیل شده است (شکل ۴-الف-ج). توده‌های نفوذی و ساختارهای زمین‌شناسی از قبیل گسل‌ها و درزه‌ها مجراهایی برای عبور سیال کانه‌ساز هستند و در رخداد کانه‌زایی نقش مهمی دارند. اسکارن معدن جو بر اساس نوع و درصد کانی‌های شاخص به مناطق مختلف تقسیم شده است. ترکیب گارنت‌های معدن جو در گستره آندرادیت-گراسولار (بیشتر آندرادیت) و ترکیب پیروکسن‌ها در گستره دیوپسید-هدنبرگیت (بیشتر دیوپسید) و در گستره اسکارن‌های آهن دار قرار می‌گیرند (شکل‌های ۷-پ، ۸-پ). ترکیب اجزای گارنت‌های معدن جو میان Andradit: 49.82-83.60، Grossular: 10.44- میان Spessartine: 0.26-0.83 و پیروکسن معدن جو میان Wollastonite: 39.18-50.77، Enstatite: 33.99- میان Forsterite: 4.89-16.43 در نوسان است. در آنومالی آهن سنجدک ا تغییرات ترکیب گارنت‌ها از مرکز به حاشیه برای آندرادیت از ۴۲/۶ تا ۱۰۰ درصد، برای گراسولار از صفر تا ۵۵/۳۲ درصد و برای اسپسارتین از صفر تا ۷/۳۹ درصد در تغییر است و ترکیب پیروکسن‌ها برای دیوپسید از ۶۳ تا ۹۲ درصد، برای هدنبرگیت از چهار تا ۳۵ درصد و برای ژوهانسیت از ۰/۵ تا ۳/۹ درصد تغییر می‌کند (مظهری و همکاران، ۱۳۹۵). ترکیب گارنت‌ها در آنومالی‌های آهن A، A' و C جنوبی، آندرادیت-گراسولار ($Adr_{50-97}Gr_{0-45}$) و ترکیب پیروکسن‌ها هدنبرگیت-دیوپسید ($Sps-Alm_{2-7}$) است. ترکیب پیروکسن‌های آنومالی‌های آهن باغک و C شمالی دیوپسیدی ($Hd_{20}Di_{80}$) است (Golmohammadi et al., 2015). ترکیب گارنت‌ها در آنومالی آهن دردوی آندرادیت-گراسولار ($Andradite_{40}$) و ترکیب پیروکسن‌ها در گستره دیوپسید-هدنبرگیت (بیشتر دیوپسید) است (Mehrabietal., 2021).

منشا کان سنگ آهن عنبر کوه استان فارس. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۹، ۳۴، ۸۵-۱۰۲.

- رحمانی جوانمرد، س.، طهماسبی، ز.، دینگ، ز. و احمدی خلجی، ا.، ۱۳۹۹. بررسی رفتار زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب خاکی در گارنت‌های موجود در سنگ‌های دگرگونی پهنه بروجرد (پهنه سندرچ-سیرجان). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴، ۵۳، ۸۷-۱۰۷.

- سربوزی حسین‌آبادی، آ.، بومری، م. و گل محمدی، ع.، ۱۳۹۹. مطالعه کانه‌زائی آهن بغل‌بید با استفاده از شواهد زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی، سنگان خواف در شمال خاوری ایران. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴، ۵۴، ۵۴-۳۷.

- فتوت جامی، م.، ۱۳۹۸. کانی‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و الگوی پیدایش کانسار آهن معدن جوه، آنومالی شرقی معدن سنگ آهن سنگان، جنوب شرقی خواف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۳۰۲. - گل محمدی، ع.، مظاهری، س.ا.، ملک‌زاده شفارودی، آ. و کریم‌پور، م.ح.، ۱۳۹۳. سن‌سنجی زیرکن با روش U-Pb و ژئوشیمی توده‌های گرانیتی سرخر و برمانی شرق معدن سنگ آهن سنگان خواف. مجله پترولوژی، ۵، ۱۷، ۸۳-۱۰۲.

- مظهری، ن.، ملک‌زاده شفارودی، آ. و قادری، م.، ۱۳۹۵. ژئوشیمی توده‌های نفوذی، سنگ‌شناسی اسکارن، کانی‌شناسی و شیمی ماده معدنی در آنومالی سنجک‌ا، خاور مجموعه معدنی سنگان خواف. فصلنامه علوم زمین، ۲۵، ۱۰۰، ۲۴۶-۲۳۵.

- Aydin, F., Thompson, R.M., Karsli, O., Uchida, H., Burt, J.B. and Downs, R.T., 2009. C2/c pyroxene phenocrysts from three potassic series in the Neogene alkaline volcanics, NE Turkey: their crystal chemistry with petrogenetic significance as an indicator of P-T conditions. *Contribution in Mineralogy and Petrology*, 158 (1), 131-147.

- Barnes, H.L., 1997. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3rd Edition, New York, John Wiley and Sons, 992.

- Beane, R.E., 1983. *The Magmatic-metamorphic transition*. Geothermal Resources Council, Special Report, 13, 245-253.

مرحله اسکارن پیش‌رونده به مرحله تاخیری رخ داده است. ترکیب شیمیایی گارنت، پیروکسن و منیتیت معدن جو در گستره اسکارن‌های آهن‌دار قرار می‌گیرد. داده‌های میان‌بار سیال نشان می‌دهد، کانی‌های اسکارن پیش‌رونده در دمای ۳۳۰ تا ۴۱۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۳۳ تا ۵۸ درصد وزنی معادل نمک NaCl، کانی‌های اسکارن تاخیری در دمای ۱۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و شوری ۱۶ تا ۴۹ درصد وزنی معادل NaCl و رگه‌های کلسیت و کوارتز پس از کانه‌زائی در دمای ۹۵ تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد و شوری دو تا ۱۵ درصد وزنی معادل NaCl تشکیل شده است. به عبارتی آب ماگمایی مسئول تشکیل کانی‌های اسکارن پیش‌رونده دمای بالا و شوری زیاد است. با رقیق‌شدگی سیال ماگمایی و کاهش دمای آن در نتیجه اختلاط با آب جوی و جوشش سیال شرایط برای تشکیل سیلیکات‌های آب‌دار مرحله تاخیری و در ادامه برای کلسیت و کوارتز پس از کانه‌زائی فراهم می‌شود. شواهد صحرایی، همیافتی کانی‌شناسی، شیمی کانی و میان‌بار سیال تیپ کانه‌زائی آهن معدن جو را اگزواسکارن منیزیمی پیشنهاد می‌کند.

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود که بستر و محیط مناسبی را برای انجام این پژوهش آماده کرده‌اند، سپاسگزاری می‌نمایند. از همکاری معاونت محترم وقت برنامه‌ریزی توسعه و اکتشاف مجتمع معدن سنگ آهن سنگان جناب آقای دکتر عباس گل محمدی و مدیریت محترم اکتشاف جناب آقای مهندس علی اکبر بادامه کمال امتنان را داریم. از مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران وابسته به سازمان توسعه و نوسازی معادن صنایع معدنی ایران که تجزیه‌های ریزکاواکترونی را انجام دادند، قدردانی می‌شود. از دست اندرکاران محترم مجله و داورانی که ارزیابی مقاله حاضر را قبول می‌فرمایند، تشکر می‌شود.

منابع

- تقی‌پور، ب. و بذرافشان، آ.، ۱۳۹۴. سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی کمپلکس ماگمایی-دگرگونی توتک و تعیین

- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 1996. An introduction to the rock-forming minerals. 2 ed. Hong Kong, Longman, 695.
- Drummond, S.E. and Ohmoto, H., 1985. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. *Economic Geology*, 80, 126-147.
- Dupuis, C. and Beaudoin, G., 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 46(4), 319-335.
- Driesner, T. and Heinrich, C.A., 2007. The system H₂O-NaCl. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature-pressure-composition space from 0 to 1000 °C, 0 to 5000 bars, and 0 to 1X NaCl. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(20), 4880-4901.
- Einaudi, M., Meinert, L.D. and Newberry, R.J., 1981. Skarn deposits. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume, 317-391.
- Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A. and Mazaheri, S.A., 2015. Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangan iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews*, 65(2), 545-563.
- Groat, L.A., Turner, D.J. and Evans, R.J., 2014. Gem Deposits. In *Treatise on Geochemistry*, 2nd ed.; Holland, H.D., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 13, 595-622.
- Haas, J.L., 1971. The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology*, 66 (6), 940-946.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, Floyd, Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. and Vikre, P.G., 2010. Porphyry copper deposit model, chap. B of Mineral deposit models for resource assessment. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 5070-B, 169.
- Mehrabi, B., Ghasemi Siani, M., Zhang, R., Neubauer, F., Lentz, D.R., Tale Fazel, E. and Karimi Shahraki, B., 2021. Mineralogy, petrochronology, geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Dardvay skarn iron deposit, Sangan mining district, NE Iran. *Ore Geology Reviews*, 134, 104146.
- Meinert, L.D., Dipple, G.M. and Nicolescu, S., 2005. World Skarn Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary: Littleton, CO, USA*, Volume 299-336.
- Meinert, L.D., 1992. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19 (4), 145-162.
- Nimis, P. and Taylor, W.R., 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part 1 Calibration and testing of a Cr-in-cpx barometer and an enstatite-in-cpx thermometer. *Contribution in Mineralogy and Petrology*, 139, 541-554.
- Putirka, K.D., 2008. Thermometers and barometers for volcanic systems, in: *Minerals, inclusions and volcanic processes*, edited by: Putirka, K. and Tepley, F. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 69, 61-120.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Blackie, Glasgow, 239.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52 (7), 1229-1258.
- Whitney, D.L. and Evans B.W., 2010. Abbreviations Sheferd et al., for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- Wilkinson, J.J., 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272.
- Yavuz, F., 2013. WinPyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry. *American Mineralogist*, 98(7), 1338-1359.